0254-6124/2016/36(1)-077–06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

ZHAO Yanzhen. Positioning of high Earth orbit satellite using GPS/Beidou combined system (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2016, **36**(1): 77-82. DOI:10.11728/cjss2016.01.077

基于 GPS/北斗组合系统的高轨卫星定位技术研究

赵彦珍

(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 针对目前高轨 GPS 信号可用性差及定位精度低的特点, 对 GPS/北斗组合系统的高轨卫星定位技术进行研究, 对比分析了单 GPS 系统与 GPS/北斗组合系统的卫星可见性和几何精度因子. 结果表明, GPS/北斗组合系统比单 GPS 系统的卫星可见性好, 且定位精度高. 同时通过提出在星载接收机上采用高精度原子钟, 可实现三星定位, 降低对接收机的技术要求.

关键词 GPS 系统, 北斗系统, 可见性, 几何精度因子, 星载接收机

中图分类号 V 249

Positioning of High Earth Orbit Satellite Using GPS/Beidou Combined System

ZHAO Yanzhen

(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

(*University of Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract The characteristics of current high orbit GPS (Global Positioning System) signal are of poor availability and low positioning accuracy. Positioning of high Earth orbit satellites using GPS/Beidou combined system is studied. The visibility of navigation satellites and the Geometric Dilution of Precision (GDOP) are analyzed. Through simulation and analyzing, it is verified that the GPS/Beidou combined system has better performance than that of single GPS system. On one hand, the GPS/Beidou combined system can receive more satellites' signal than single GPS system. On the other hand, GDOP of the GPS/Beidou combined system is smaller than that of single GPS system. At the same time, the use of high-precision atomic clock in the satellite receiver can realize positioning of three satellites, and reduce the technology requirements of receiver.

Key words GPS (Global Positioning System), Beidou system, Visibility, GDOP, Satellite receiver

---

2015-01-07 收到原稿, 2015-09-04 收到修定稿

E-mail: yzyz181858@163.com

0 引言

GPS 导航系统可以实现全球、全天候的高精度实时定位 [1]. 对于地球上任意位置的用户, 在任意时刻至少能接收到 4 颗 GPS 卫星信号. 近年来利用星载 GPS 接收机对低轨道 (LEO) 卫星的定位技术已渐成熟. 随着 GPS 系统以及微弱信号捕获技术的发展, 接收机应用范围逐步从低轨扩展到高轨 [2].

GPS 卫星发射天线均为对地天线, 高轨卫星接收机只能接收从地球对面 GPS 卫星发射来的信号, 且由于地球遮挡, 只能接收到由 GPS 卫星发射天线波束边缘所构成环形锥内的导航信号. GPS 发射天线的主瓣波束宽度为 42.6°, 地球对 GPS 信号的遮挡角为 27.8°, 因此只有很少一部分主瓣波束能够到达高轨星载接收机.

考虑到高轨星载接收机接收信号难及定位稳定性差的特点, 本文在 GPS 系统基础上引入北斗系统, 实现 GPS 系统与北斗系统的联合导航. 北斗卫星导航系统由区域发展到全球. 2012 年 12 月 27 日, 北斗卫星导航系统服务性能规范 [3] 发布, 标志着北斗区域系统正式建成. 截至 2012 年 12 月底, 北斗系统在轨工作卫星包括 5 颗地球静止轨道 (GEO) 卫星、5 颗倾斜地球同步轨道 (IGSO) 卫星和 4 颗中圆地球轨道 (MEO) 卫星.

本文根据中欧合作引力红移探测 (GRESE) 提议, 设置 GRESE 轨道为大椭圆轨道, 远地点高度在 60 000 km 以上, 位于导航卫星信号覆盖范围之外. 在有效载荷配置中使用了星载氢原子钟, 该原子钟精度比导航卫星精度高两个数量级, 可为星载 GNSS 提供频标辅助定位. 星载 GNSS 接收机为 GRESE 卫星提供精密的位置和速度信息.

1 卫星可见性分析

1.1 信号传播链路

通信链路包括信号发射、空间传播及接收三部分, 信号传播链路原理如图 1 所示. 整个链路的工作过程为: 发射信号经发射机发射天线放大后, 发射出功率为 $P_{\rm t}$ 的信号, 该信号在空间中传播后到达接收机天线, 由接收天线放大后到达接收机的射频前端, 此时功率为 $P_{\rm r}$, 对信号进行处理后可解算出时间、速度及位置信息.

接收终端功率方程为 [4]

$$P_{\rm r} = P_{\rm t} + G_{\rm t} - L_{\rm p} - L_{\rm a} + G_{\rm r}. \tag{1}$$

式中, $P_{\rm r}$ 为接收机的接收功率 (接收机灵敏度), $P_{\rm t}$ 为卫星发射功率, $G_{\rm t}$, $G_{\rm r}$ 分别为发射天线和接收天线的增益, $L_{\rm p}$ 为路径损耗, $L_{\rm a}$ 为大气损耗.

卫星通信电波在传播过程中要受到损耗, 其中最主要的是自由空间传播损耗, 其占总损耗的绝大部分, 并且传播距离越大, 自由空间损耗越大, 有

$$L_{\rm p} = 20\lg(4\pi d/\lambda). \tag{2}$$

其中, λ 为信号传输波长, d 为接收机到卫星的直线距离.

1.2 卫星可见性仿真

利用 STK 软件模拟卫星系统的工作模型, 仿真生成一天的卫星轨道参数和图形, 分析 GEO 星载接收机对卫星的可见情况和定位精度等特性. 仿真参数设置列于表 1.

图 2、图 3 和图 4 分别给出了在不同接收机灵敏度下 GEO 星载接收机对单 GPS 系统导航的可见卫星数, 图 5、图 6 和图 7 分别给出了在不同接收机灵敏度下 GEO 星载接收机对 GPS/北斗组合系统导航的可见卫星数.

由图 2 和图 5 的仿真结果可以看出, 当接收机灵敏度为 −170 dBw 时, 两种导航方式的可见星数目均很少, 接收机最多只能接收到 3 颗单 GPS 系统卫星信号, 而最多能接收到 5 颗 GPS/北斗组合系统卫星信号, 基本不能进行定位.

从图 3 和图 6 可以看出, 当接收机灵敏度达到 −175 dBw 时, 对于单 GPS 导航系统, 接收机大部分时间只能接收到 1 颗卫星信号, 最多时能够接收到 5 颗卫星信号, 而对于 GPS/北斗组合导航系统, 接收机大部分时间能够接收到 4 颗卫星信号, 而最多时能够接收到 10 颗卫星信号.

由图 4 和图 7 可知, 当接收机灵敏度达到 −190 dBw 时, 可见卫星数明显增多, 但对于单 GPS 导航系统, 大部分时间可见卫星数为 2 颗, 大约 50% 时间的可见卫星数达到 4 颗, 最多时可见卫星数达到 9 颗, 而 GPS/北斗组合系统可保证接收机在任意时刻都能够接收到至少 4 颗卫星的信号, 最多时能接收到 14 颗卫星信号.

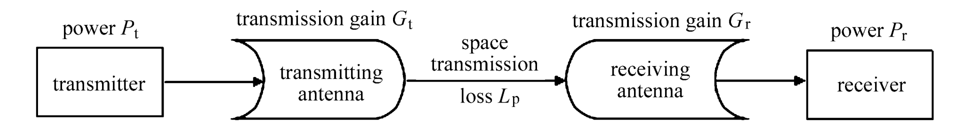


图 1 信号传播链路原理

Fig. 1 Signal transmission link diagram

表 1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameters

项目	参数
仿真场景	仿真时间长度: 1 d
	仿真时间段: 2014-11-04 04:00:00 LTB—2014-11-05 04:00:00 LTB
GPS 系统	星数: 31
北斗系统	星数: 14
	计算步长: 60 s[5]
发射机	天线指向: 地心
	载波频率: $L_1 = 1575.42$ MHz
	载波频率: $B_1 = 1561.098$ MHz
接收机	灵敏度: −170～−190 dBw
	信号处理耗时: 用户设置, 默认 32 s
用户星	噪声温度: 290 K[6]
	天线指向: 用户高度比 GPS/北斗高时指向地心, 低时指向天顶

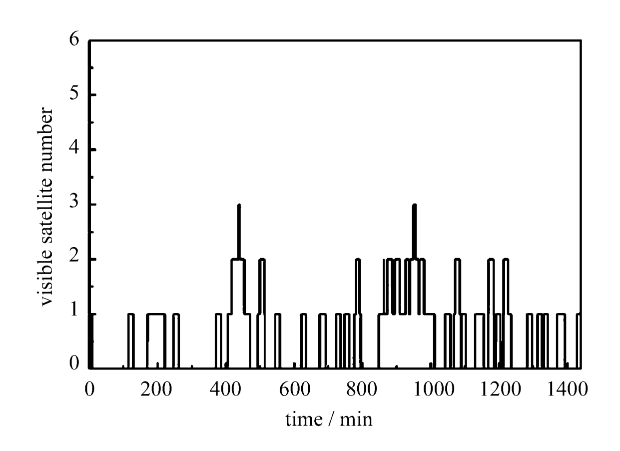


图 2 接收机功率为 −170 dBw 时 GPS 系统 GEO 可见卫星数

Fig. 2 GPS satellites visible numbers of GEO satellite when the sensibility of GPS receiver is −170 dBw

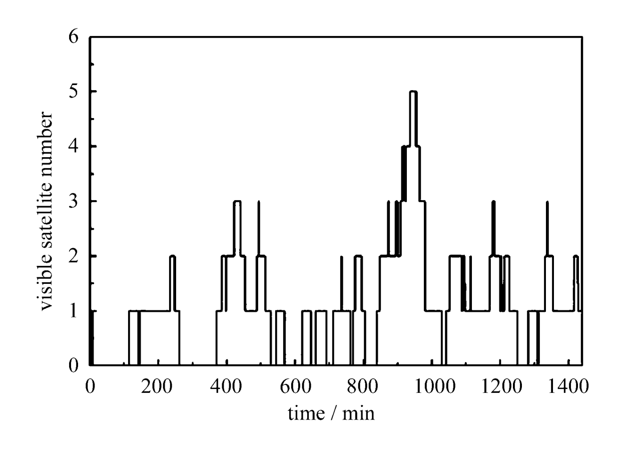


图 3 接收机功率为 −175 dBw 时 GPS 系统 GEO 可见卫星数

Fig. 3 GPS satellites visible numbers of GEO satellite when the sensibility of GPS receiver is −175 dBw

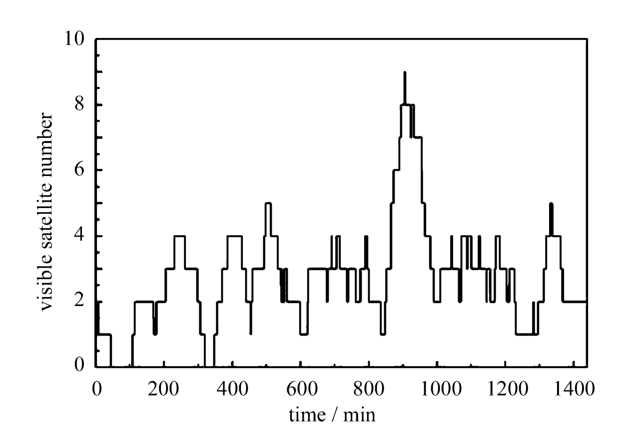


图 4 接收机功率为 −190 dBw 时 GPS 系统 GEO 可见卫星数

Fig. 4 GPS satellites visible numbers of GEO satellite when the sensibility of GPS receiver is −190 dBw

2 几何精度因子

几何精度因子 (GDOP) 包括三维定位精度因子 (PDOP)、水平位置精度因子 (HDOP)、垂直位置精度因子(VDOP)和时间偏差因子(TDOP), 而

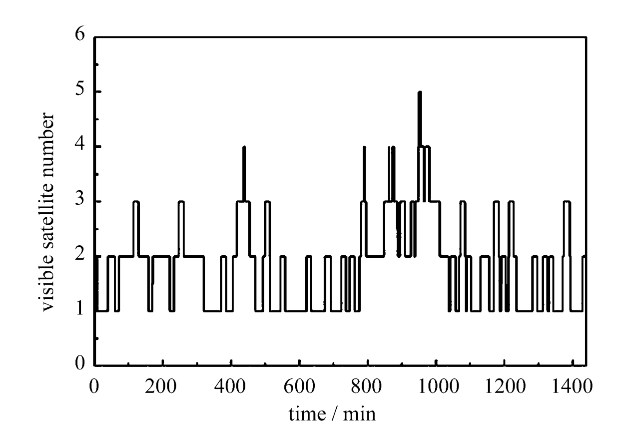


图 5 接收机功率为 −170 dBw 时 GPS/北斗组合系统 GEO 可见卫星数

Fig. 5 GPS satellites visible numbers of GEO satellite when the sensibility of GPS receiver is −170 dBw

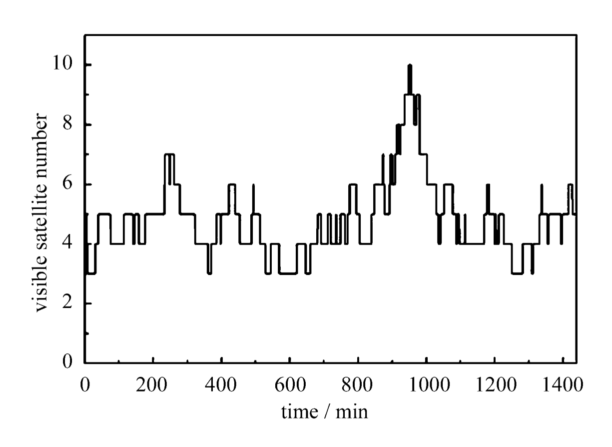


图 6 接收机功率为 −175 dBw 时 GPS/北斗组合系统 GEO 可见卫星数

Fig. 6 GPS satellites visible numbers of GEO satellite when the sensibility of GPS receiver is −175 dBw

GDOP 集中体现了这几种精度因子的特性. 影响卫星导航定位精度的因素主要有两个方面: 一是观测量精度, 二是卫星的空间几何分布. 典型的 4 星定位 GDOP 可表示为 [7]

$$|K_{\rm GDOP}|=\left|\frac{[{\rm Trace}\boldsymbol{H}^*(\boldsymbol{H}^{\rm T})^*]^{1/2}}{6V}\right|=\frac{A^{1/2}}{6}\frac{1}{V}. \quad (3)$$

其中, $\boldsymbol{H}^*$ 为 $\boldsymbol{H}$ 的伴随矩阵, V 为由用户到卫星的单位矢量末端四点联成的四面体体积. 式 (3) 表明, V 越大, GDOP 值越小, 即 4 颗定位卫星构成的四面体的体积越大, 相应的 GDOP 值越小.

GDOP 值越小, 导航卫星的定位精度越高; 反之, GDOP 值越大, 导航卫星的定位精度越差. 精度因子的等级划分列于表 2.

图 8 和图 9 分别仿真了 GEO 星载接收机在 GPS 导航系统和 GPS/北斗组合导航系统下的

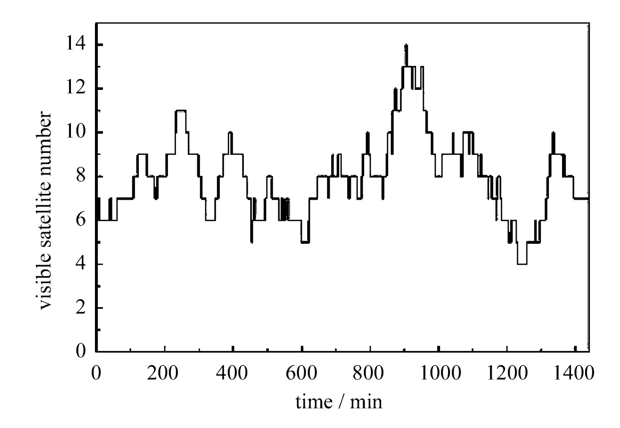


图 7 接收机功率为 −190 dBw 时 GPS/北斗组合系统 GEO 可见卫星数

Fig. 7 GPS satellites visible numbers of GEO satellite when the sensibility of GPS receiver is −190 dBw

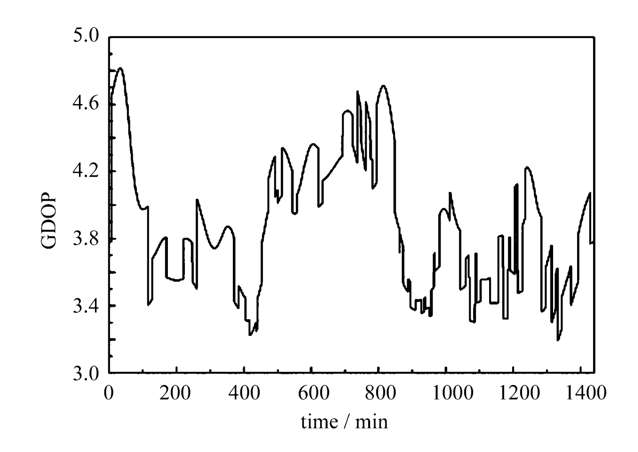


图 8 GEO 在 GPS 导航下的 GDOP 值

Fig. 8 GDOP value when the GEO receiver is navigated by GPS navigation

表 2 DOP 等级划分

Table 2 DOP grade classification

DOP 值	等级
1	最优
2~3	优
4~6	良
7~8	中
9~20	合格
> 20	差

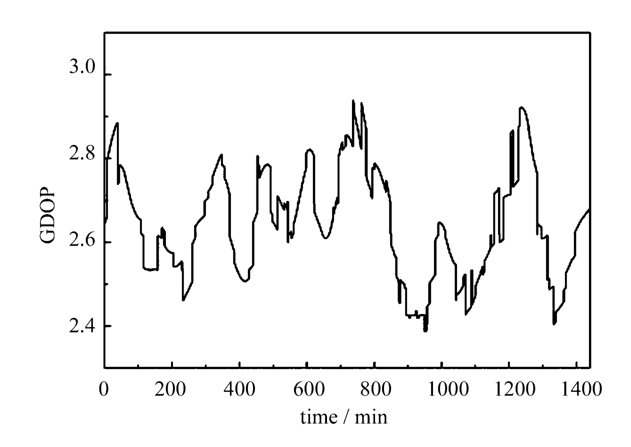


图 9 GEO 在 GPS/北斗导航下的 GDOP 值
Fig. 9 GDOP value when the GEO receiver is navigated by GPS/Beidou combined navigation

GDOP 值. 从图 8 可以看出, 对于 GEO 星载接收机, 使用单 GPS 系统导航的 GDOP 值范围为 3.2~4.8. 从图 9 可以看出, 使用 GPS/北斗组合系统导航的GDOP值范围为 2.4~2.95. 其中, 单GPS系统导航的 GDOP 值等级为良, GPS/北斗组合系统导航的 GDOP 值等级为优. 这两种情况下 GDOP 值的变化范围均较小, 属于高精度区, 但是 GPS/北斗组合系统导航的 GDOP 值比单 GPS 系统的 GDOP 值范围小, 说明多系统联合导航的定位精度相对较高, 也较为可靠.

将 GDOP 值仿真结果与相应可见卫星数仿真结果相结合进行分析可知, 可见卫星数越多时 GDOP 值越小; 反之 GDOP 值越大. 由此可知, GDOP 值与可见卫星数成反比.

3 三星定位

理想情况下接收机只需接收 3 颗卫星信号即可解算出位置坐标, 但是接收机时钟与导航卫星的高精度原子钟不同步, 存在钟差 Δt. 因此在实际情况中需要接收 4 颗卫星信号才能定位.

设 4 颗导航卫星的位置坐标分别为 (X_1, Y_1, Z_1), (X_2, Y_2, Z_2), (X_3, Y_3, Z_3), (X_4, Y_4, Z_4), 接收机位置坐标为 (X, Y, Z), 4 颗导航卫星到接收机的距离计算公式分别为

$$R_1 = \sqrt{(X-X_1)^2+(Y-Y_1)^2+(Z-Z_1)^2}+\Delta tc,$$
$$R_2 = \sqrt{(X-X_2)^2+(Y-Y_2)^2+(Z-Z_2)^2}+\Delta tc,$$
$$R_3 = \sqrt{(X-X_3)^2+(Y-Y_3)^2+(Z-Z_3)^2}+\Delta tc,$$
$$R_4 = \sqrt{(X-X_4)^2+(Y-Y_4)^2+(Z-Z_4)^2}+\Delta tc. \tag{4}$$

式中 c 为光速.

高轨星载接收机只能接收导航卫星发射的微弱信号, 在接收机灵敏度较低的情况下很难同时接收到 4 颗导航卫星信号, 从图 4 和图 7 的仿真结果中也可以看出, 当接收机灵敏度达到 −190 dBw 时, 虽然 GPS/北斗组合系统能够进行可靠定位, 但是提高接收机的灵敏度难度较大, 高动态及弱信号的接收机硬件实现代价极高; 而基于软件的算法改进捕获速度较慢, 信号质量不理想, 一直是该领域研究的难点 [8], 因此要使接收机灵敏度达到 −190 dBw, 技术实现方面仍很困难.

引力红移探测 (GRESE) 提议是利用高精度星载氢原子钟 (其精度高于导航卫星星载原子钟) 测量地球引力红移的, 可利用此原子频标辅助定位. 如果高轨卫星接收机上有星载高精度原子钟, 则不存在接收机钟差 Δt, 从而由钟差 Δt 引起的测距误差 Δtc 可以消除, 只需接收 3 颗导航卫星信号即可解算出接收机位置坐标.

从图 6 中可以看出, 对于 GEO 星载接收机, 当接收机灵敏度达到 −175 dBw 时, GPS/北斗组合系统导航定位可以保证在 100% 的时间内接收机至少观测到 3 颗卫星, 因此能够进行可靠定位. 而对于单 G-PS 系统导航, 即使接收机灵敏度达到 −190 dBw, GEO 星载接收机只有大约 60% 的时间可以接收到 3 颗导航卫星信号.

4 结论

通过对单 GPS 系统与 GPS/北斗组合系统导航的仿真分析可以得出如下结论.

(1) 仅使用单 GPS 系统进行导航定位不能满足高轨卫星用户的导航定位需求, 而采用 GPS/北斗组合系统导航定位时, 由于卫星数目多, 而且卫星的空间几何构型范围大, 因此能够保证高轨用户的可靠导航定位.

(2) GPS/北斗组合系统的 GDOP 值相对于单 GPS 系统的 GDOP 值要小, 说明 GPS/北斗组合系统导航定位精度高, 可靠性强.

(3) 基于 GRESE 提议, 利用星载高精度氢原子钟可以极大程度上辅助定位, 在只接收 3 颗导航卫星信号的状态下实现定位, 降低了对接收导航信号的技术要求.

以上研究可为类似高轨、大椭圆轨道利用导航系统定位提供很好的技术方案.

参考文献

[1] LIU Haiying, WANG Huinan. Orbit determination of satellite on the middle-high Earth orbit based on GPS [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2005, **25**(4):293-297 (刘海颖, 王惠南. 基于 GPS 的中、高轨道航天器定轨研究 [J]. 空间科学学报, 2005, **25**(4):293-297)

[2] AXELRAD P, BRADLEY B K, Tombasco J, Mohiuddin S, Donna J. GEO satellite positioning using GPS collective detection [C]//23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation 2010. Oregon, Portland: Institute of Navigation, 2010: 2717-2731

[3] YUN Cheng. Public Service Performance Specification of Beidou Satellite Navigation System(1.0) [EB/OL]. [2013-12-01]. http://www.beidou.gov.cn/attach/2013/12/26/20-131226fe8b20aad5f34091a6f8a84b08b1c4b1.pdf

[4] WEN Changyuan, YUE Fuzhan, CHOU Yuehua. Analysis of high altitude GPS signal availability [J]. *Electr. Design Eng.*, 2014, **22**(2):29-33 (闻长远, 岳富占, 仇跃华. 高轨 GPS 信号可用性分析 [J]. 电子设计工程, 2014, **22**(2): 29-33)

[5] HE Qingxu, SUN Qiangui. A new solution of autonomous navigation for GEO satellites based on GNSS [J]. *J. Spacecr. TT& C Technol.*, 2010, **29**(1): 7-11 (何清举, 孙前贵. 利用 GNSS 实现高轨卫星自主导航的新方案 [J]. 飞行器测控学报, 2010, **29**(1):7-11)

[6] CHEN Shanshan, LIANG Zhiguo, ZHANG Mengyang. Design of on-board GPS receiver using STK [J]. *J. Syst. Simul.*, 2014, **26**(1): 45-50 (陈姗姗, 梁志国, 张孟阳. 利用 STK 辅助星载 GPS 接收机设计 [J]. 系统仿真学报, 2014, **26**(1): 45-50)

[7] QIN Honglei, LIANG Minmin. Research on positioning of high Earth orbital satellite using GNSS [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2008, **28**(4): 316-325 (秦红磊, 梁敏敏. 基于 GNSS 的高轨卫星定位技术研究 [J]. 空间科学学报, 2008, **28**(4): 316-325)

[8] FAN Shiwei, MENG Yinan, GAO Weiguang, LI Li. Summarizing on the development of spacecraft orbit determination technology [J]. *J. Geomat. Sci. Tech.*, 2013, **30**(6): 549-554 (樊士伟, 孟轶男, 高为广, 李里. 航天器测定轨技术发展综述 [J]. 测绘科学技术学报, 2013, **30**(6): 549-554)